

А. В. Скворцов, Л. Н. Ширкина

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ПРЯМЫХ РЕШЕТОК  
С ПЕРЕМЕННЫМ УГЛОМ УСТАНОВКИ ПРОФИЛЯ  
ПО ВЫСОТЕ ЛОПАТКИ

## Условные обозначения

- $t$  — шаг решетки;  
 $b$  — хорда профиля;  
 $\chi_1$  — входной угол средней линии профиля;  
 $\chi_2$  — выходной угол средней линии профиля;  
 $\Theta = \chi_1 + \chi_2$  — угол изгиба профиля;  
 $x_f$  — относительное положение прогиба средней линии профиля;  
 $\gamma$  — угол установки профиля в решетке;  
 $\alpha_{1к} = \gamma + \chi_1$  — конструктивный угол профиля на входе в решетку;  
 $\alpha_{2к} = \gamma + \chi_2$  — конструктивный угол профиля на выходе из решетки;  
 $\alpha_1, \alpha_2$  — углы потока на входе в решетку и на выходе из нее;  
 $i = \alpha_1 - \alpha_{1к}$  — угол атаки профиля в решетке;  
 $\sigma = \alpha_2 - \alpha_{2к}$  — угол отставания потока в решетке;  
 $q_1, q_2$  — гидравлические напоры на входе и выходе из решетки;  
 $\bar{C}_{a2} = C_{a2}/C_{a1}$  — торможение осевой скорости потока в решетке.

Современные методы профилирования лопаточных венцов, т. е. определение формы и числа лопаток в венце, исходят из гипотезы цилиндрических сечений Н. Е. Жуковского. Эта гипотеза предполагает независимость работы каждого элементарного венца от работы смежных элементарных венцов и сводит профилирование кольцевых решеток, на которые разбит лопаточный венец, к определению их геометрических параметров в соответствии с заданными треугольниками скоростей на входе в решетку и на выходе из нее без учета кинематики потока и геометрических параметров кольцевых решеток, расположенных выше и ниже рассматриваемой кольцевой решетки. Тогда профилирование лопатки ступени сводится к рациональному подбору кольцевых решеток.

Однако при поверочных расчетах осевых компрессоров установлено [1], что изменение угла выхода потока из лопаточного венца ( $\alpha_2$ ) по его высоте приводит в концевых сечениях лопатки к нарушению гипотезы цилиндрических сечений. В виду сложности этого явления в венцах осевых компрессоров, а именно: значительного изменения по высоте лопатки торможения осевой скорости  $\bar{C}_{a2}$ , поля давления на входе  $P_1^*$ , к. п. д. решетки — целесообразно провести исследования на более простых объектах. Для этой цели были использованы плоские решетки профилей и прямые решетки с различными углами установки профилей по высоте лопаток, которые продувались на

продувочном стенде, описанном в работе [2]. Было обеспечено незначительное изменение основных параметров потока по высоте канала, что позволило упростить явления, имеющие место в межлопаточных каналах осевого компрессора, и выделить влияние изменения конструктивного угла выхода из решетки по ее высоте на угол отставания потока.

В эксперименте использовались решетки, составленные из профилей Б-60-09, с параметрами  $\bar{t}=t/b=0,6$ ;  $b=80$  мм;  $\Theta=60^\circ$ ;  $\bar{x}_f=0,45$ ,  $\chi_1=36^\circ$ ,  $\chi_2=24^\circ$ , средней линией профиля — параболой. Лопатки прямых решеток имели: в среднем сечении по хорде ( $\Delta h=80$  мм) высоту 160 мм, от периферии до среднего сечения постоянный угол  $\gamma=10^\circ$ . Начиная со среднего сечения, угол установки профиля плавно менялся, достигая во втулочном сечении максимального отличия от угла установки в среднем сечении. В таблице даны конструктивные углы на входе в решетку и на выходе из нее при разных отличиях угла установки во втулочных сечениях от угла установки в средних сечениях ( $\Delta\gamma$ ) и на различных высотах от втулочного сечения ( $\Delta h$ ).

Т а б л и ц а

$\Delta\gamma$ , град	$\alpha_{1к}$ , град		$\alpha_{2к}$ , град	
	$\Delta h$ , мм			
	15	80	15	80
—20	31,5	46	—28,3	—14
—10	38,3	46	—21,6	—14
— 5	42,3	46	—17,7	—14
0	46,0	46	—14,0	—14
+ 5	49,6	46	—10,4	—14
+10	53,6	46	— 6,4	—14
+20	60,4	46	0,4	—14

Сечение, в котором оценивалось влияние изменения конструктивного угла выхода из решетки на угол отставания потока, находилось на высоте 15 мм от втулочной трактовой поверхности на выходе из решетки. Это связано с тем, что в этом сечении в отличие от сечений, расположенных ближе к втулке, наиболее стабильные замеры, в то же время градиент изменения конструктивного угла выхода потока близок к максимальному. В этом сечении исследовались прямые решетки с различными углами установки профилей, но с постоянным значением этого угла по высоте, а также прямые решетки, составленные

из лопаток с переменным углом установки профилей по высоте. В сечении  $\Delta h = 15$  мм производилось сравнение углов отставания потока при одинаковых углах установки профилей. Кроме того, углы отставания потока сравнивались в среднем сечении ( $\gamma = \text{const}$ ) в решетках с наличием переменного угла выхода потока по высоте.

При обработке результатов измерений ввиду малых значений сжимаемость воздуха не учитывалась. На входе и выходе из решетки замеры производились комбинированной шайбой, которой можно определить не только полное и статическое давление, но и направление потока даже при наличии поперечного градиента скорости за решеткой в следе от пограничного слоя. На входе в решетку измерялись скоростной напор  $q_1 = p_1^* - p_1$  и угол набегания потока  $\alpha_1$  в пяти точках по высоте лопатки. На выходе вдоль шага решетки измерялись соответственно  $q_2 = p_2^* - p_2$  и  $\alpha_2$  через 2 мм (25 замеров). Измеренные величины скоростных напоров и углов потока на выходе из решетки осреднялись арифметически по шагу. Для выполнения условия  $\bar{C}_{a2} = 1$  было сделано расширение канала: на входе высота канала была 150 мм, на выходе — 165 мм. Этим было достигнуто минимальное изменение осевой составляющей скорости в средних сечениях:  $\bar{C}_{a2} = 0,96 - 1,03$ . Изменение осевой составляющей скорости потока, осредненной по шагу, определялось по соотношению:  $\bar{C}_{a2} = C_{a2}/C_{a1} = (\cos \alpha_2 / \cos \alpha_1) \sqrt{q_2/q_1}$ .

Полученные экспериментальные характеристики прямых компрессорных решеток строились в виде зависимостей  $\sigma = f(\alpha_1)$  для двух исследуемых сечений при разной закрутке лопаток и при различных углах набегания потока, т. е. при различных углах атаки. Значения углов отставания потока сравнивались с аналогичными значениями, полученными при продувках прямых решеток с постоянным углом установки профилей по высоте лопатки.

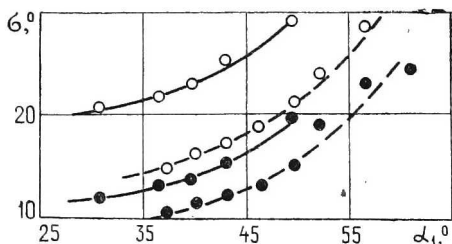
В частности, для решеток с переменным значением  $\gamma$  и соответственно  $\alpha_{2к}$  в сечении  $\Delta h = 15$  мм угол установки профилей имел следующие значения:  $\gamma = -5; 2; 6; 17; 24^\circ$ , в то время как в сечении  $\Delta h = 80$  мм угол установки профилей был постоянным  $\gamma = 10^\circ$ . Для сравнения были использованы результаты продувок прямых решеток в том же сечении, но с постоянным углом установки профилей [2]  $\gamma = -5; 2; 6; 17; 24$  и  $10^\circ$ .

На рис. 1 приведены значения углов отставания потока в сечении  $\Delta h = 15$  мм. Наличие изменения угла установки профиля и конструктивного угла выхода потока по высоте лопатки приводит к увеличению угла выхода потока из решетки. В частности, больший градиент изменения конструктивного угла выхода дает большее увеличение угла отставания потока, кроме того, это изменение угла отставания не зависит от режима работы решетки, т. е. от угла атаки.

Исследования углов отставания потока в сечении  $\Delta h = 80$  мм показали, что эти углы практически одинаковы для решеток с переменным и с постоянным по высоте углом  $\alpha_2$  к (рис. 2).

Рис. 1. Изменение угла  $\sigma$  в зависимости от  $\alpha_1$  в сечении  $\Delta h = 15$  мм:

○ —  $\gamma = -5^\circ$ , ● —  $\gamma = 2^\circ$ ;  
 — — — крученная лопатка,  
 — — — прямая лопатка



Этот факт дает возможность предположить, что дополнительный угол отставания потока  $\Delta\sigma_{кр}$ , вызванный изменением конструктивного угла выхода из решетки по высоте лопатки, увеличивается в зависимости от величины этого изменения.

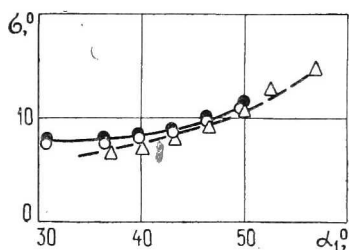
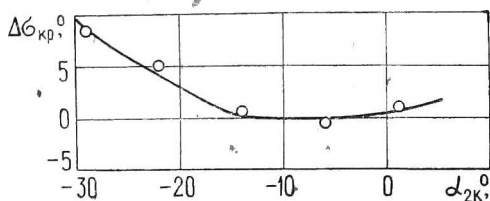


Рис. 2. Изменение угла  $\sigma$  в зависимости от  $\alpha_1$  в сечении  $\Delta h = 80$  мм:

○ —  $\gamma = -5^\circ$ ; ● —  $\gamma = 2^\circ$ ; △ —  $\gamma = 10^\circ$ ;  
 — — — крученная лопатка, — — — прямая лопатка

На рис. 3 показана полученная в исследованных решетках зависимость влияния величины изменения конструктивного угла выхода из решетки на увеличение недоворота потока в решетке ( $\Delta\sigma_{кр}$ ). Величина  $\Delta\sigma_{кр}$  растет с увеличением закрутки в сторону уменьшения угла установки, что соответствует изменению закрутки в компрессорных лопатках от периферии ко втулке. При изменении закрутки в другую сторону недоворот потока в рассматриваемой решетке по сравнению с плоской решеткой отсутствует.

Рис. 3. Изменение  $\Delta\sigma_{кр}$  в зависимости от изменения  $\alpha_2$  в сечении  $\Delta h = 15$  мм



В заключение можно сделать вывод о том, что проведено исследование эффекта увеличения угла отставания потока в краевых сечениях прямого лопаточного венца на простейшей модели прямой компрессорной решетки. Получены результаты, качественно подтверждающие данные работы [1].

## Л и т е р а т у р а

1. Комаров А. П. Влияние радиальных зазоров в лопаточных венцах на характеристики осевого компрессора.— В сб.: Проектирование и доводка авиационных газотурбинных двигателей /КуАИ, 1984.
2. Комаров А. П. Исследование плоских компрессорных решеток.— В сб.: Лопаточные машины и струйные аппараты, 1967, № 2.

УДК 621.45 : (621.525.5—531.3+536.183)

А. И. Иванов, К. И. Куликов, В. Н. Орлов

## РЕГУЛИРОВАНИЕ ДВУХСТУПЕНЧАТОГО ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА СПОСОБОМ ПЕРЕПУСКА

### Условные обозначения

- $\rho$  — плотность;  
 $p$  — давление;  
 $T$  — температура;  
 $Q$  — объемный расход;  
 $p_v$  — давление насыщенного пара;  
 $n$  — частота вращения;  
 $\Delta p$  — повышение давления;  
 $h = (p_{вх}^* - p_v)/\rho$  — кавитационный запас;  
 $Q/n$  — относительный расход;  
 $h/n^2$  — относительный кавитационный запас;  
 $n_s = 3,65 n \sqrt{Q} / (\Delta p_n / \rho)^{0,75}$  — коэффициент быстроходности ступени насоса;  
 $C_{кр} = 5,62 n \sqrt{Q} / h_{ср}^{0,75}$  — кавитационный коэффициент быстроходности ступени насоса;  
 $K_d = Q_p / Q_{min}$  — степень дросселирования.

### И н д е к с ы

- н — насос;  
вх, вых — вход, выход;  
р — расчетный;  
ср — срывной;  
ст — ступень;  
ш, РК — шнек, рабочее колесо;  
min — минимальный;  
I, II — первая, вторая ступени;

\* — параметр заторможенного потока.